

波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の研究開発 - 波浪制御特性および海水交換特性について -

大村智宏^{*1}・中村孝幸^{*2}・大井邦昭^{*3}・中山哲巖^{*4}・榎木 亨^{*5}

Development of a Seawater Exchange Breakwater with a Water Chamber by Use of Wave Induced Vortex Flows

Yoshihiro OHMURA^{*1}, Takayuki NAKAMURA^{*2}, Kuniaki OHI^{*3},
Akiyoshi NAKAYAMA^{*4}, and Toru SAWARAGI^{*5}

Abstract: We developed a new seawater exchange breakwater based on a curtain-wall type breakwater having double row curtain walls with different draft depth. It has a water chamber partly sheltered by a vertical curtain wall in front of a rear vertical wall and has a submerged horizontal plate attached to the rear and side walls. The vortex flows are generated at around lower edge of a front vertical wall by the piston mode wave motion in a water chamber, which provides the mechanism of changing wave power to vortex flow. Simultaneously, the significant currents occur at a water channel on the bottom due to wave induced vortex flows beneath a front curtain wall. It is confirmed that the new breakwater has an ability of conducting shoreward water through water channel into outside harbors, which is the opposite direction as compared to the previously proposed seawater exchange breakwaters. Alternative vortices generated from the lower edge of a front wall help to enhance the aeration and vertical diffusion. It also affirms that the new breakwater not only has a sufficient sheltering effect for incoming waves but also has a great deal of wave energy dissipation function to reduce reflected waves for the wide range of wave frequency.

Key words: Seawater exchange breakwater, Submerged horizontal plate, Piston mode wave motion, Vortex induced currents

はじめに

滞留海域の水質・底質環境問題を克服する手段の一つとして、海水交換を積極的に促進する海水交流施設の整備がこれまで進められてきた。このうち、波浪エネルギーを利活用する海水交換防波堤については、波を流れに変換する機構を備えた各種構造体が提案され、既に、全国各地の漁港等で実用化されている。海

水交換は、港外水を港内へ導水し泊地内での流動化を促すことで図られ、実海域での効果調査によってその有用性についても実証されている（土木学会編，2000）。

著者らも、波を利用する海水交流施設として、砕波あるいは越波に伴う水位上昇を活用し導水を図る多段潜堤式海水導入工（大村ら，1997；Ohmura，2006）や、水表面付近の波の質量輸送を用いる円孔式海水導入工（大村，2002）の研究開発に取り組み、その結果、鹿

2007年2月6日受理 水産総合研究センター業績水工研C第47号

^{*1} 水産工学研究所水産土木工学部開発システム研究室

^{*2} 愛媛大学工学部環境建設工学科

^{*3} 愛媛大学大学院理工学研究科（現所属 技研興業株式会社）

^{*4} 水産工学研究所水産土木工学部水理研究室

^{*5} 財団法人災害科学研究所

児島県今和泉漁港(第2種漁港),島根県浜田漁港(特定第3種漁港)において,それぞれ実用化された。いずれの施設も優れた導水機能や曝気機能を有するという特長があるものの,海象条件や経済性,施工性等の観点から踏まえると,当然ながら適応範囲は制約されたものとなる。

そこで,新たな海水交流施設の開発を模索していたところ,従来から存在する導水原理とは全く異なる機構を発見した。そして,この機構を活用した海水交換防波堤の研究開発に取り組み,波浪制御効果と海水交換促進効果を併せ持つ構造体として,波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の開発に成功した。本防波堤は,異吃水二重壁式防波堤(中村ら,1999)を原型とし,その遊水室内に没水平版を設置した構造(中村ら,2002)になっている。遊水室内のピストンモードの波動運動を原動力に,前面壁下部付近に強い渦流れを発生させることで,波から渦流れへとエネルギー変換される。同時に,没水平版による渦流れの制御によって,堤体下部に設けた通水部を介して有意な平均流が生成され,海水交換が図られる仕組みである。

本報では,この遊水室型海水交換防波堤の海水交換特性および波浪制御特性について,水理模型実験および理論解析によって検討し,その有用性を明らかにしたので報告する。

波から渦流れへのエネルギー変換機構の解明

検討方法

波浪制御効果と海水交換促進効果を併せ持つ海水交換防波堤の開発を目的に,異吃水二重壁式防波堤とその遊水室内に水平版を付加した構造体を対象として水理特性を検討することとした。このため,長水路での水理模型実験と減衰波理論およびVolume of Fluid (VOF)法の数値計算を実施して水理現象の解明を図った。

1) 実験装置および実験方法

a) 堤体模型の構造諸元

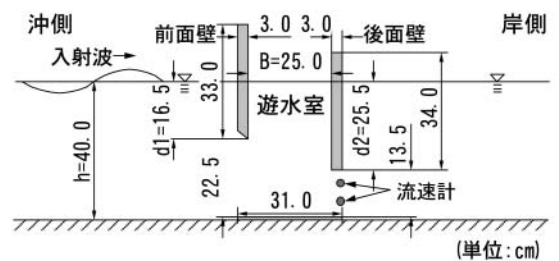
堤体の基本構造として, Fig. 1(a)に示す異吃水二重壁式防波堤を用いた。この堤体は,遊水室内のピストンモード波動運動に起因する反射波の低減効果を期待した構造である。後面壁の通水部の開口率は34%とし,通常のカーテン式防波堤で用いられる一重カーテン壁のそれと比較して大きく設定した。さらに,この基本構造に改良を加えた構造体として,遊水室内に水平版を設置し下部に通水部を設けた水平版付き防波堤(Fig. 1(b))と,水平版をより岸側に延長した水平版

延長防波堤(Fig. 1(c))を採用した。ここでは水平版長の影響を把握するため,岸側に延長した構造も検討対象に加えた。

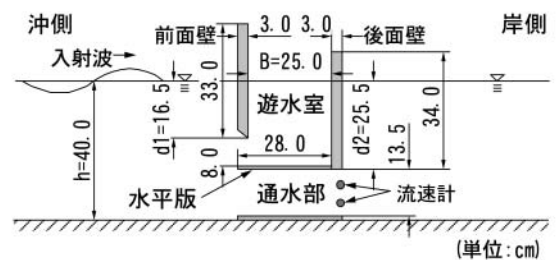
b) 実験条件

水理模型実験は, Fig. 2に示す水産工学研究所漁港水理実験棟の2次元造波水路(長さ100.0m×幅1.0m×高さ1.5m)で実施した。この水路の一端には反射波吸収制御式ピストン型造波装置が,他端には再反射波を防ぐために砕石およびヘチマロンで構成される消波工を設置している。1/10勾配のすりつけ部および水平床は,厚さ2.0cmの鉄板を用いて製作した。本すりつけ部の法先には約9.0cmの通水部を設け,水平床下で水の循環ができるようにし,堤体前後で水位差が生じないように工夫した。いずれの堤体模型も,上から見た1基あたりの外郭寸法は幅31.0cm,長さ49.5cmであり,水平床上に2基を並列して設置した。ここで,模型縮尺は1/10~1/20程度を想定した。

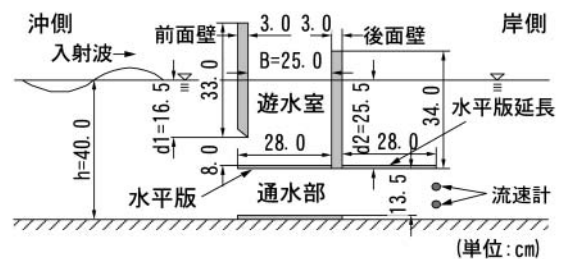
Table 1に実験条件を一括して示す。実験波は,目標波高が $H=5.0, 10.0$ cmの2種類,目標周期が $T=1.0 \sim 1.95$ s間の7種類の規則波である。水深は $h=40.0$ cmとした。表中には,目標波高,目標周期と併せて,実



(a) 異吃水二重壁式防波堤 (基本構造)



(b) 水平版付き防波堤



(c) 水平版延長防波堤

Fig. 1 堤体模型の構造諸元

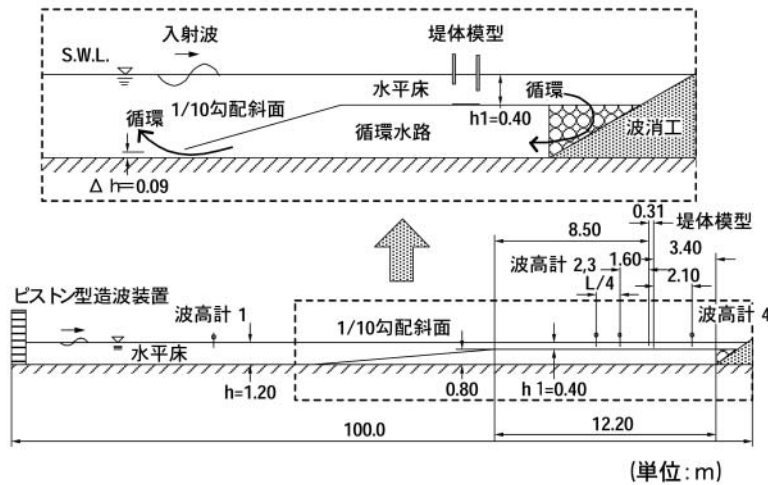


Fig. 2 実験に用いた長水路

Table 1 実験に用いた波条件

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	L (cm)	L / B
1.00	5.0	4.99	146.3	5.85
1.20	5.0	4.70	193.5	7.74
1.20	10.0	9.28	193.5	7.74
1.40	5.0	4.23	239.1	9.56
1.40	10.0	8.52	239.1	9.56
1.50	10.0	9.46	261.4	10.46
1.65	5.0	4.36	294.3	11.77
1.65	10.0	8.88	294.3	11.77
1.80	5.0	3.72	326.7	13.07
1.80	10.0	7.58	326.7	13.07
1.95	5.0	3.93	358.7	14.35
1.95	10.0	8.33	358.7	14.35

際の入射波高 H と波長 L および波長と遊水室幅 B の比 L/B を表す。

計測は、4台の容量式波高計による水位変動およびL型電磁流速計による下部通路の岸側開口部の流速について実施した。波高計1は沖での波を、波高計2、3は堤体前面での波を、また波高計4は堤体模型後方の波を測定するために用いた (Fig. 2)。反射率については、波高計2、3の計測値を用いて入・反射波の分離推定法 (合田ら, 1976) により求めた。一方、透過率については、水路に堤体を設置しない状態における入射波高と、堤体設置時の波高計4による透過波高の比で定義した。

2) 数値計算の方法

a) 減衰波理論

反射波・透過波の算定には、中村・井出 (1997) により展開されている線形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論を用いた。この算定法は、カーテン式防波堤など隅角部を有する構造物を対象に、鋭角部からの流れの剥離や渦流れの発生現象によるエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、線形減衰を有する流体

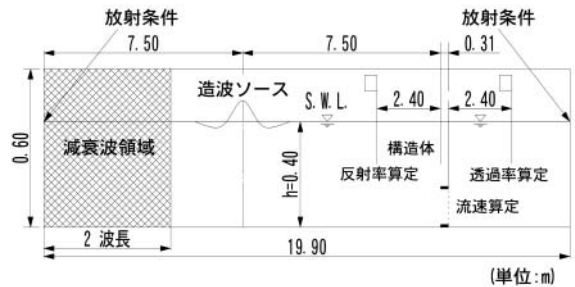


Fig. 3 計算に用いた水路

を想定している。本理論は、極めて短時間で計算結果が得られることから、水理模型実験の構造諸元決定の事前検討時にも用いた。ここで、線抵抗係数 f は、従来の研究結果 (中村ら, 1999) より $f=0.2$ とした。

b) Volume of Fluid (VOF) 法

波浪制御効果の把握を主な目的として、Volume of Fluid (VOF) 法 (沿岸開発技術研究センター, 2001) も併せ用いて検討した。この方法は、自由水面を有する非圧縮粘性流体の流体現象を数値解析的に取り扱う方法の一つで、ナビエ・ストークス方程式を基礎方程式とする数値流体力学 (CFD) の分野に属するものである。

計算で用いた水路はFig. 3に示すものであり、計算領域は長さ19.9m×高さ0.6m、格子間隔を水平方向1.0cm、鉛直方向0.5cmで一定とし、堤体からの反射波を吸収する無反射造波水路とした。計算条件はTable 2に示すとおりである。また、計算の模型諸元は前面壁先端の刃型部を除き水理模型実験のそれと同一とし、作用波条件も実験での目標波高、周期の組み合わせを用いて、計算結果と実験結果を比較検討できるようにした。計算は静水状態から17s間造波して擬似定常状態を再現し、堤体設置の有無のそれぞれ5周期分

Table 2 VOF法の計算条件

計算領域	長さ(x-) 19.90m, 高さ(z-) 0.60m
格子間隔	$x=0\sim 19.90\text{m}$, $\Delta x=1.0\text{cm}$ $z=0\sim 0.60\text{m}$, $\Delta z=0.5\text{cm}$
波条件	規則波: 造波波高 $H=10.0\text{cm}$ 周期 $T=1.20, 1.40, 1.50, 1.65, 1.80, 1.95\text{s}$
水深	$h=0.40\text{m}$
造波ソース	$x=7.5\text{m}$
境界条件	Sommerfeldの放射条件 ($x=0.0, 19.90\text{m}$) エネルギー減衰帯 ($x=0.0$ から2波長)
構造体設置位置	$x=15.0\text{m}$
移流項	中心差分と風上差分の割合; 8:2
VOF関数 F	フリー
その他境界・諸量	スリップ
ポラス値下限値	0.0001
気泡上昇速度	0.2m/s
水滴落下速度	フリー
造波時間	静水状態から17s間
時間差分間隔	CFL条件および粘性項の安定条件から決まる 時間刻み幅に0.2を乗じた時間
サンプリング間隔	$T/100$

のエネルギー比から反射・透過率を算定した。

結果および考察

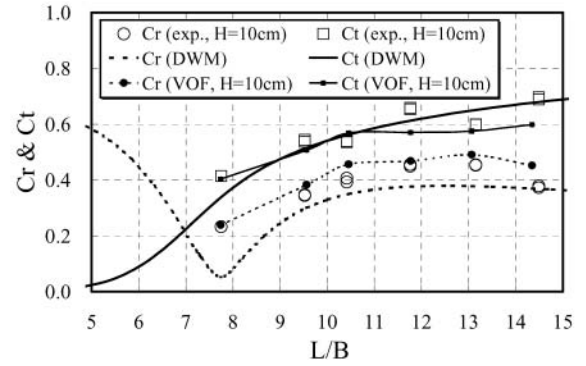
1) 波浪制御特性

Fig. 4は、基本構造の異吃水二重壁式防波堤、水平版付き防波堤、水平版延長防波堤のそれぞれの反射率 Cr 、透過率 Ct について、水理模型実験結果と数値計算結果を併せて示したものである。ここでは、周期に関するパラメータとして、波長・遊水室幅比 L/B で無次元化し整理した。図中において、水理模型実験結果はexp, 減衰波理論計算結果はDWM, VOF法計算結果はVOFとそれぞれ表記している。

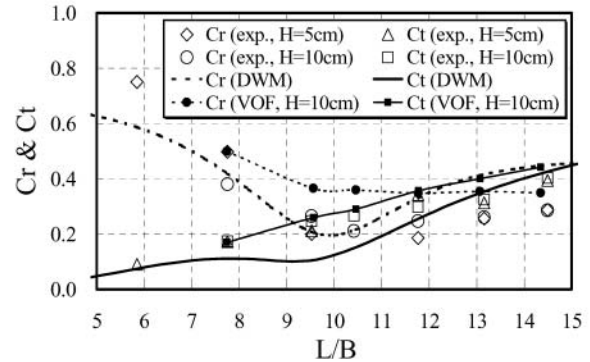
次に、波から渦流れ等へとエネルギー変換される割合を把握するため、エネルギー逸散量 $EL (= 1 - Cr^2 - Ct^2)$ を算定した。Fig. 5は、目標波高10cmでのエネルギー逸散量の実験結果および計算結果を各構造体別に示したものである。

a) 基本構造の異吃水二重壁式防波堤

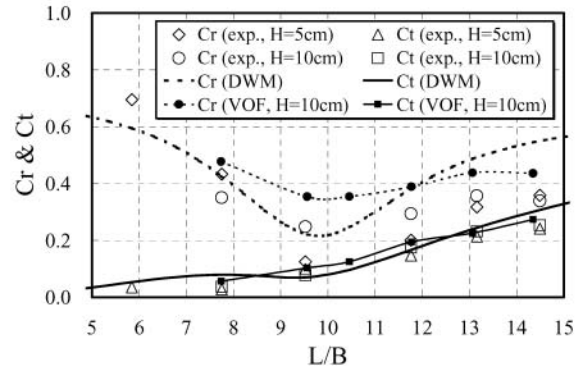
反射率は、実験結果および計算結果ともに $L/B=7.8$ 付近で極小値となることがFig. 4(a)よりわかる。この極小値において、減衰波理論算定値は $Cr=0.06$ 、実験値は $Cr=0.22$ 、この時の透過率の実験値は $Ct=0.40$ であり、最も低反射・低透過を実現する周期条件になっている。これは、反射率が極小となる条件下において遊水室内のピストンモードの波浪共振が発生し、前面カーテン壁下部付近に強い渦が形成されることによる。また、反射率が極小となる条件下でのエネルギー逸散量については、Fig. 5(a)に示すように減衰波理論算定値は $EL=0.91$ 、実験値は $EL=0.78$ となり、入射波エネルギーの大部分が逸散して渦等の形成に費や



(a) 異吃水二重壁式防波堤



(b) 水平版付き防波堤



(c) 水平版延長防波堤

Fig. 4 反射・透過率

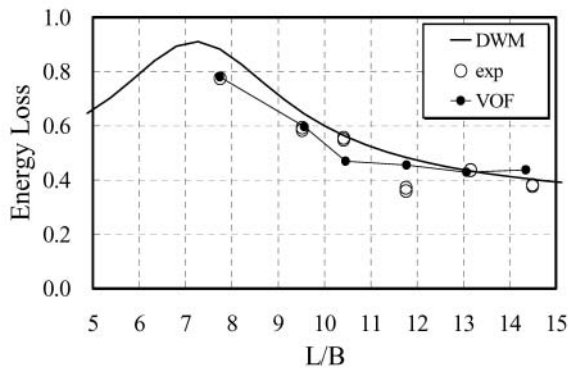
されている。

一方、透過率については、 $L/B > 9.3$ の長周期側において実験値、計算値ともに $Ct > 0.5$ であり、 L/B の増加に比例して反射率、透過率とも単調に増大している。

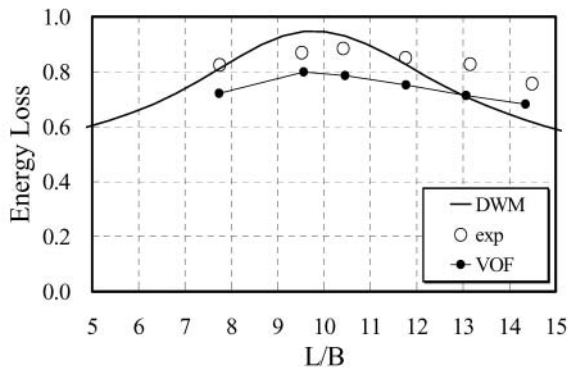
VOF法計算結果と実験結果を比較すると、反射率、透過率ともに定性的傾向のみならず、エネルギー逸散量も併せ、定量的に良好な一致が見られる。これにより、VOF法が異吃水二重壁式防波堤における強非線形波動現象の検討にあたって有効な手法であることが明らかになった。

b) 水平版を設置した構造

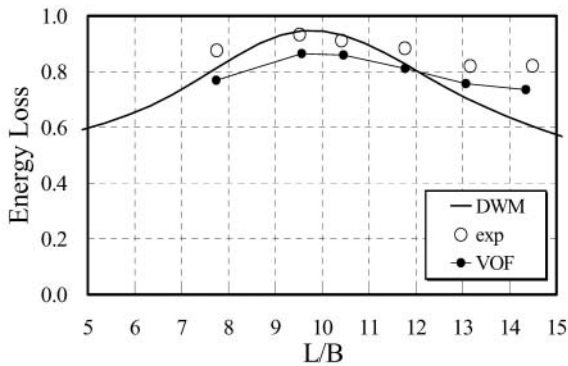
Fig. 4(b)に示すように、水平版付き防波堤では、



(a) 異吃水二重壁式防波堤



(b) 水平版付き防波堤



(c) 水平版延長防波堤

Fig. 5 エネルギー逸散量

反射率が極小を示す条件は理論算定結果および実験結果ともに L/B が10前後であり、その極小値はともに $Cr = 0.20$ 程度である。異吃水二重壁式防波堤と比較すると、反射率の極小値が長周期側に移行していることが認められる。これは、遊水室内の水深が浅くなることで、見掛けの波長が短くなることに起因しているものと推測される。また、Fig. 4(c)に示すように、水平版を延長してもほぼ同様の反射特性が見られる。このように、広い周期帯にわたって低反射特性を示すとともに、波長・遊水室幅比が相当程度大きい波周期に対しても有効であることがわかる。

一方、透過率については、 L/B のすべての領域で計

算値、実験値ともに $Ct < 0.5$ であり、水平版を設けることで低透過を実現している。これは、水平版を設けることで流体の鉛直運動が拘束されるためと考える。さらに水平版を延長した場合、より大きな面積で水粒子運動を拘束することになり、さらなる透過波の低減効果が認められる。特に、 L/B が10程度では $Ct = 0.1$ 程度であり、後面壁通水部の開口率を34%と大きく設定したにもかかわらず、低透過を実現している。

Fig. 5(b), 5(c)に示すエネルギー逸散量を見てわかるように、 L/B の幅広い領域で計算値、実験値ともに大きなエネルギー逸散が生じており、実験値では最大9割にも達する。水平版を設置したことで、広い周期帯にわたって高い消波効率を示し、入射波エネルギーが渦流等に効率的に変換されていることがわかる。また、波長・遊水室幅比が相当程度大きい波周期に対しても、防波機能がより有効に改善されていることがわかる。

VOF法計算結果と実験結果を比較すると、透過率については、水平版付き防波堤、水平版延長防波堤ともに定性的傾向のみならず、定量的にも良好な一致が見られる。一方、反射率については、計算値が実験値よりも0.1程度大きい値を示すものの、定性的傾向は十分に表現していると言える。これは、水平版を設けることで、異吃水二重壁式防波堤より複雑な流体運動が遊水室内や前面カーテン壁の沖側で生じることになり、本計算の格子サイズが遊水室内の流体现象を再現する分解能として十分ではないことが主な原因であると推察する。VOF法は、原理的に水理模型実験結果と定量的な一致が得られる手法であると考えており、今後、大きな制約となっている計算時間の短縮を工夫しつつ、計算方法および条件を見直してさらに検討していきたい。

以上、遊水室内に背後壁開口部に一致するように水平版を設置して通水部を設けると、反射波の低減効果を損なうことなく、効果をさらに増大させることが判明した。しかも透過波についても大きく低減することが可能になるなど、波浪制御効果の改善に有効な構造体であることが明らかになった。

2) 通水特性

Fig. 6は、各構造体の通水部で計測した水平流速の時系列を示したものである。波条件は目標波高 $H = 10\text{cm}$ 、周期 $T = 1.4\text{s}$ であり、岸向きの流速を正、沖向きの流速を負と定義した。この図より、異吃水二重壁式防波堤では、上の流速計で正負の流速振幅がほぼ等しく、下の流速計で正の流速振幅が大きくなっており、岸向きの流れが卓越していることがわかる。一方、水平版を設けると正よりも負の流速振幅が大きくなり、

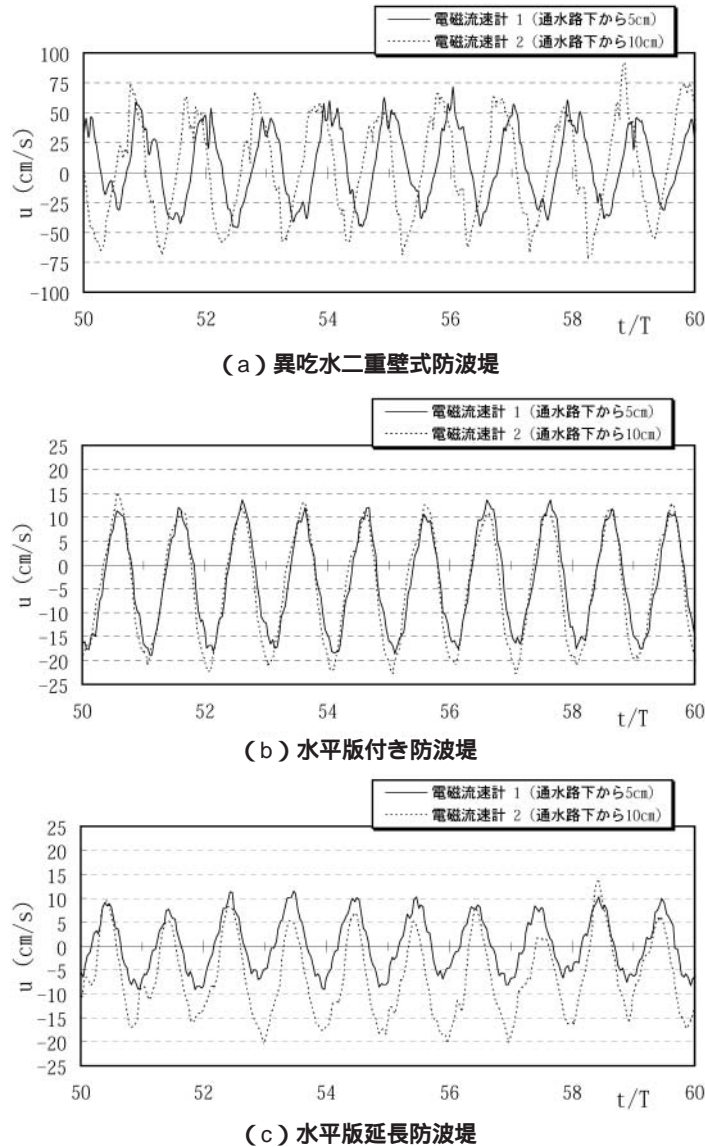


Fig. 6 通水部における流速の時系列(H=10.0cm ,T=1.4s)

沖向きの流れが卓越している。また、流速振幅の大きさに着目すると、異吃水二重壁式防波堤と比較して水平版付き防波堤の全流速振幅の値は1/3程度となり、水平版延長防波堤ではさらにその値が小さくなっている。先に示した透過率の実験結果と併せて考えると、やはり、この通水部での流速振幅が透過波の生成に大きく影響していることがわかる。

Fig. 7 は、波長・遊水室幅比 L/B と各構造体の下部通水部における無次元輸送流量との関係を示したものである。ここで、無次元輸送流量 Q^* は1波・単位幅当たりを通過する時間平均輸送流量 Q を算定し、これを波の質量輸送量である峰の水塊量(= $HL/2$)で除したものと定義した。

まず、水平版がないと透過波に付随する岸向きへの流量を生じるが、水平版を設置することで沖向きの流

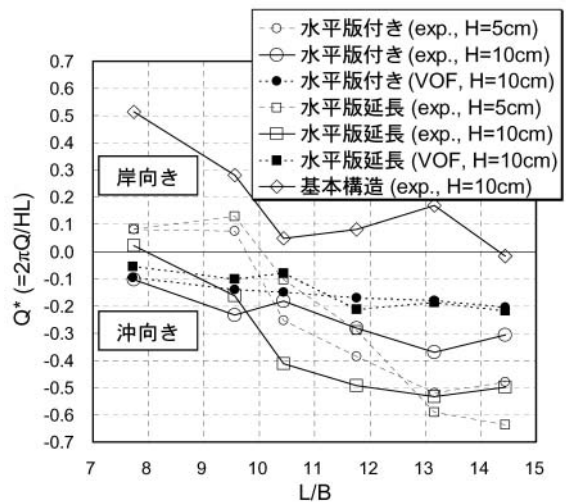


Fig. 7 下部通水部における無次元輸送流量

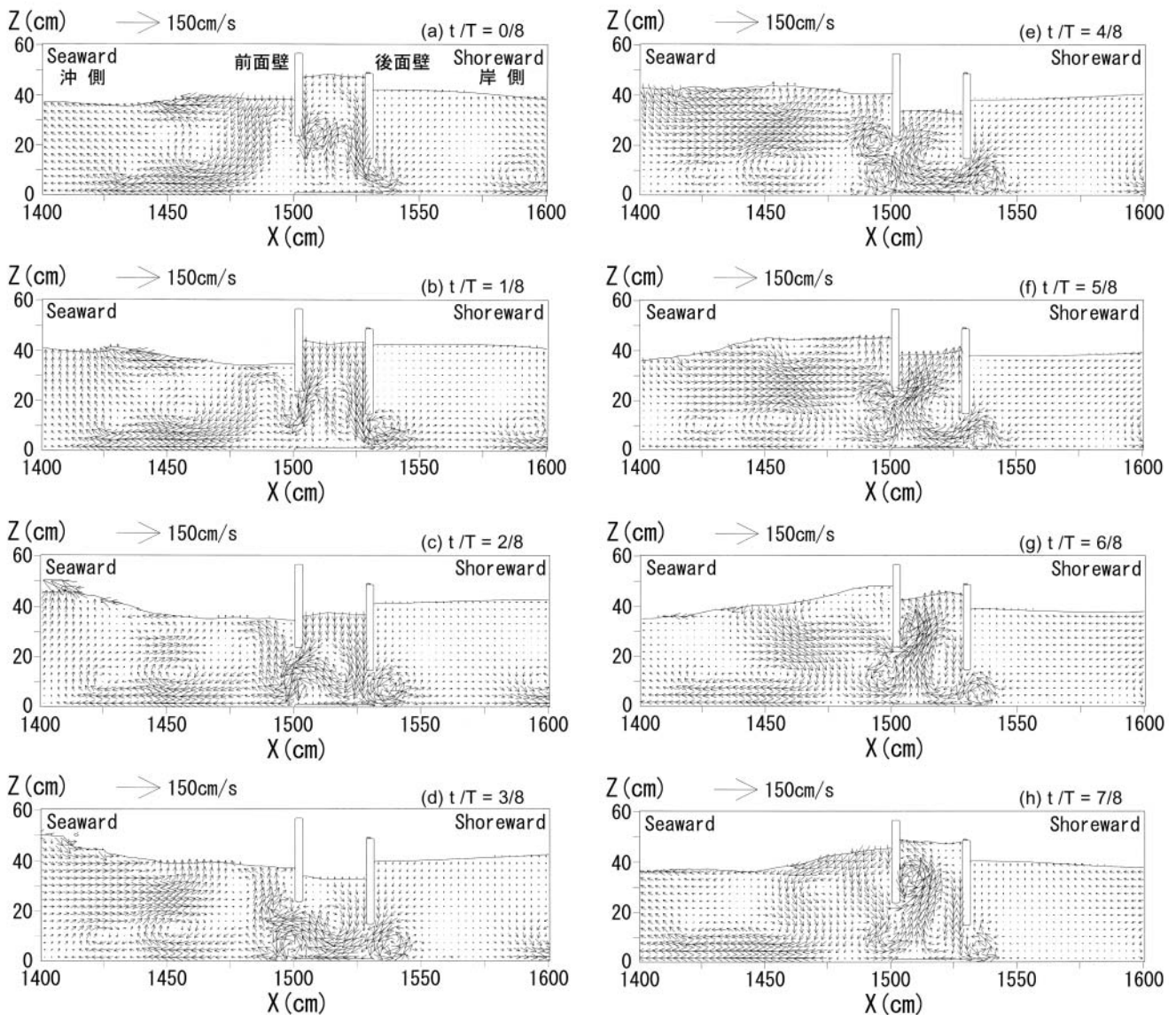


Fig. 8 異吃水二重壁式防波堤の流況 ($H=10.0\text{cm}$, $T=1.4\text{s}$, VOF法)

れが発生していることがわかる。水平版付き防波堤、水平版延長防波堤ともに目標波高5cmでは L/B が10以下の領域で岸向きへの導水機能が見受けられるものの、ほぼすべての周期帯で沖向きの流れが発生する実験結果が得られた。また、水平版付き防波堤、水平版延長防波堤ともに波周期が長くなるにしたがって無次元流量は増大しており、 L/B が12を超える領域では峰の水塊量の実に3～6割もの排水が行われている。これは先に示した波浪制御特性において、入射波のエネルギーフラックスの大きな長周期側でも低反射・低透過を表すことから、波から渦流へのエネルギー変換量と無次元流量のあいだに密接な関連を有することが推測される。水平版付き防波堤と水平版延長防波堤の無次元流量を比較すると、 L/B が10～12程度を境に性能が逆転しており、短周期側では水平版付き防波堤の方

が、一方、長周期側では水平版延長防波堤の方が性能の良いことがわかる。

なお、VOF法計算結果と実験結果を比較すると、水平版付き防波堤、水平版延長防波堤ともに定量的のみならず定性的にも一致度は良好でない。これは、本計算の水路は循環水路として設定していないこと、先述したように本計算の格子サイズでは複雑な流体現象を再現するだけの十分な分解能を有していないことの2点に起因するものと思われる。

3) 渦流の特性

VOF法計算結果の一例として、波高 $H=10\text{cm}$ 、周期 $T=1.4\text{s}$ の波条件における各構造体の流況をFig. 8～10にそれぞれ示す。これらの図は、造波後15.6sから $T/8$ 毎の水表面および流速ベクトルを表示したものであり、水表面はVOF関数 $F=0.5$ でコンターを描画した。

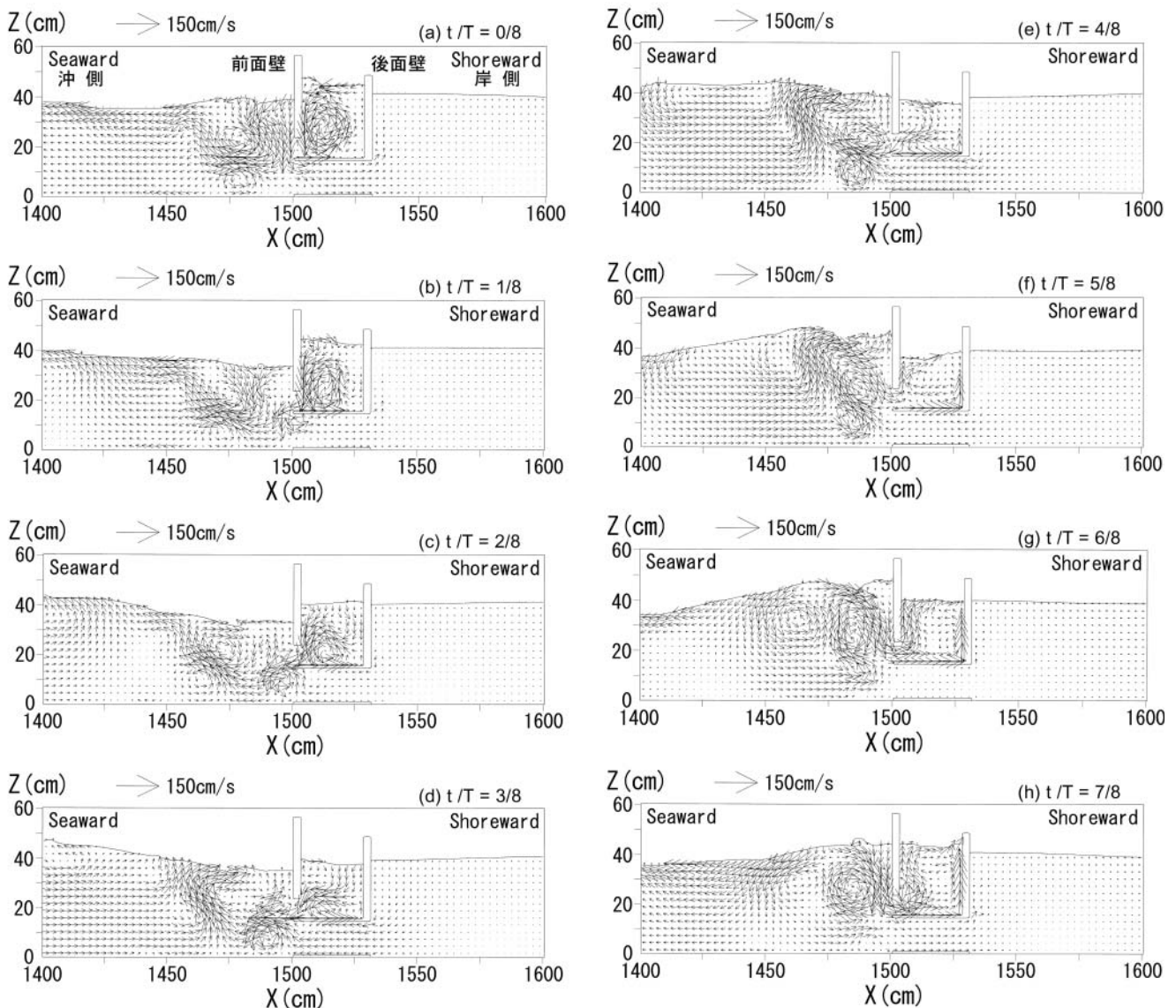


Fig. 9 水平版付き防波堤の流況 ($H = 10.0\text{cm}$, $T = 1.4\text{s}$, VOF法)

異吃水二重壁式防波堤では、遊水室内の水表面が波周期に合わせて上下動するピストンモードの波動運動が生じ、前面および後面カーテン壁の近辺で複雑かつ大規模な渦流が発生していることが図からわかる。このピストンモードの波動運動およびカーテン壁周辺での複雑かつ大規模な渦流は、水理模型実験でも目視確認しており、計算結果が水理現象を適切に表現していると判断できる。また、先に述べたように、波動がこの複雑かつ大規模な渦流運動に変換されることで、低反射、低透過を実現する機構になっていると考える。

一方、水平版を設置することで、異吃水二重壁式防波堤と比較して異なる流況になることが図からわかる。異吃水二重壁式防波堤と同様に、水平版付き防波堤および水平版延長防波堤ともに遊水室内でピストンモードの波動運動は生じるものの、前面壁下端と水平

版のあいだの開口部を介し流体が出入することで、ピストンモードの波動運動が発生する点が異なる。遊水室内の流体運動は、水平版の存在により通水部の流体と無干渉な状態であり、通水部の流体の鉛直運動が拘束されることから透過波の低減効果が認められる。また、前面壁の沖側では、複雑な水面形とともに複雑かつ大規模な渦流の形成が見られる。やはり、水平版を設置した場合でも、波動運動が複雑かつ大規模な渦流運動へと変換されることによって、反射波および透過波を大幅に低減させる機構になっていると考える。

水理模型実験では、水平版を設置するとPhoto 1に示すように、遊水室内の流体の鉛直運動が拘束され、押し波時に発生する大規模な渦流を一方向回転渦として制御する、交番渦のような渦流が前面壁の沖側で発生し、鉛直混合が激しく生じる、前面壁の前後で

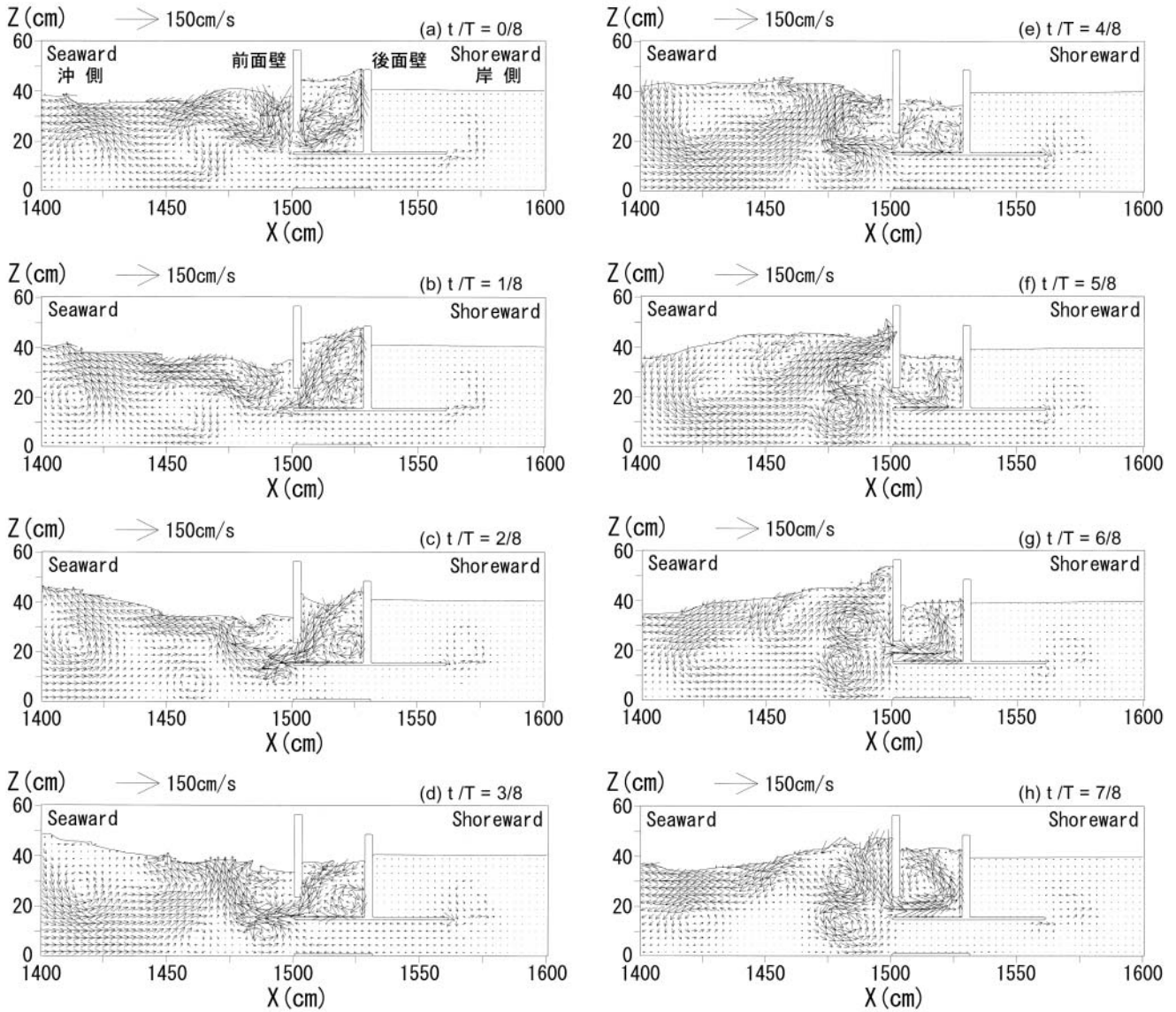


Fig. 10 水平版延長防波堤の流況 ($H = 10.0\text{cm}$, $T = 1.4\text{s}$, VOF法)

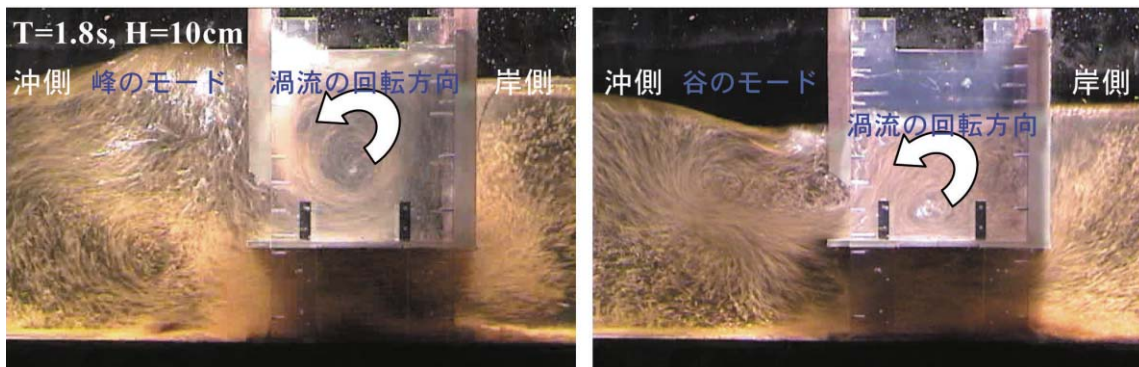


Photo 1 水平版付き防波堤の遊水室における渦流運動

曝気が生じることが確認されており、計算は現象を概ね再現していると判断する。

4) 平均流の生成機構

Fig. 11は、平均流の生成および波エネルギーの逸散機構を模式的に示したものである。平均流を生成する

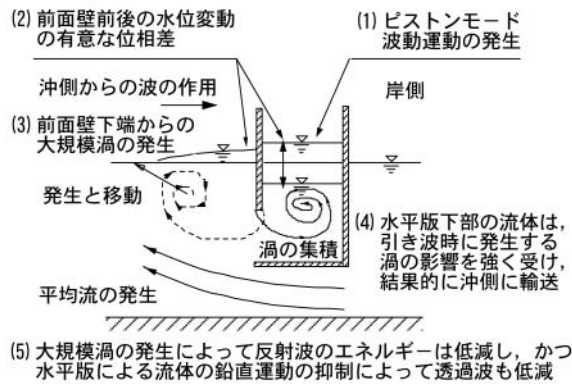


Fig. 11 平均流の生成およびエネルギー逸散機構

機構としては、水平版の存在により通水部の流体が引き波時に発生する渦の影響を強く受け、このためネットの輸送が沖方向になるものと考えられる。この時、押し波時に発生する遊水室内の渦の影響は、水平版の設置により通水部の流体には無干渉な状態となっている。

結語

異吃水二重壁式防波堤の遊水室内に水平版を設けた構造体は、より効果的な波浪制御機能に加え、海水交換促進機能をも有することが判明した。主要な結果を以下に記す。

水平版を有する構造体では、水平版がない場合と同様に遊水室内でのピストンモード波動運動を駆動力とする大規模な渦流れの発生が見られる。水平版を設置することで遊水室内の流体の鉛直運動が拘束されることから、押し波時に発生する大規模な渦流れを1方向回転渦として制御することができる。一方、堤体前面では反流を発生させることができる。

水平版は、渦流の制御効果を持つことから、結果的に沖向きの平均流を生成する吸出しポンプのような役割を果たしている。また、水平版を有する構造体は、曝気に加え、大規模な渦の発生およびその移動による鉛直混合が促進されることから、貧酸素問題を克服する海水交換防波堤として有効であることが判明した。

水平版を設置することで発生する大規模な渦流れが波浪制御に寄与しており、幅広い周期帯にわたって反射波・透過波を大幅に低減できることが判明した。水平版を岸側に延長すると、さらに透過波の低減が可能になることもわかった。

遊水室型海水交換防波堤の最適構造諸元

検討方法

異吃水二重壁式防波堤の遊水室内に水平版を設けた構造体は、より効果的な波浪制御機能に加え、海水交換促進機能をも有することが判明した。そこで、このような遊水室型海水交換防波堤を現地に適用する際に重要となる下部通水部の高さや通水部の開口率が波浪制御効果や海水交換量に与える影響などを検討する。このとき、付随的に防波堤下部に設ける捨石マウンドの有無や遊水室背後の重量部長さの影響などについても検討する。

1) 実験水槽

愛媛大学工学部環境建設工学科の2次元造波水槽(長さ25.0m×幅1.0m×高さ1.25m)で実験を行った。水路内には1/30勾配の不透過な斜面を設け、この背後には斜面に接続するように長さ約13mの水平床部を設けた。水平床部には水路幅をほぼ二分するように隔壁を設け、一方の水路で入射波が、もう一方の水路に模型堤体を設置して反射・透過波などが測定できるようにした。この隔壁の終端には、ヘチマロンと捨石斜面で構成される消波工を設け、この終端部と隔壁先端部を介して平均流が回流できる構造とした。

2) 通水部高さの検討に用いた堤体条件等

Fig. 12は堤体下部に設ける通水部高さの影響を検討するために用いた遊水室型防波堤の典型的な断面を示したものである。想定した模型の縮尺は1/20程度である。実験では、通水部高さ td を5~13.5cmの範囲で3種類に変化させ、各種の周期、波高の条件下で反射率、透過率、平均輸送流量などを測定した。平均輸送流量は、図に示すように2台の電磁流速計を堤体重量部の下側の通水部に設置して測定した。

実験では、通水部高さの変化に伴い、前面垂下版の吃水深 d_1 および遊水室内の水平版上の水深 hm が変

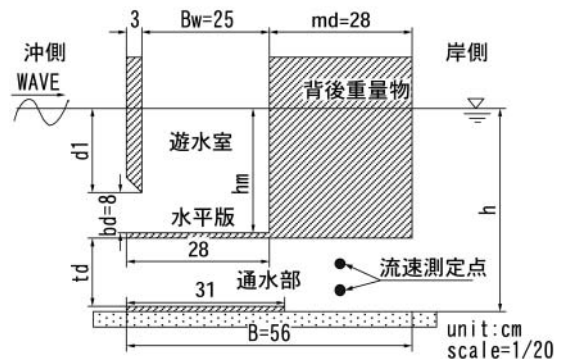


Fig. 12 堤体模型の構造諸元

Table 3 水深 h を固定したときの各寸法

通水部高さ td (cm)	水深 h (cm)	垂下版吃水深 d1 (cm)	水平版上水深 hm (cm)	td / h
5.0	40.0	25.0	33.0	0.13
9.0	40.0	21.0	29.0	0.23
13.5	40.0	16.5	24.5	0.34

Table 4 水深 h を通水部高さ td に連動させたときの各寸法

通水部高さ td (cm)	水深 h (cm)	垂下版吃水深 d1 (cm)	水平版上水深 hm (cm)	td / h
5.0	31.5	16.5	24.5	0.16
9.0	35.5	16.5	24.5	0.25
13.5	40.0	16.5	24.5	0.34

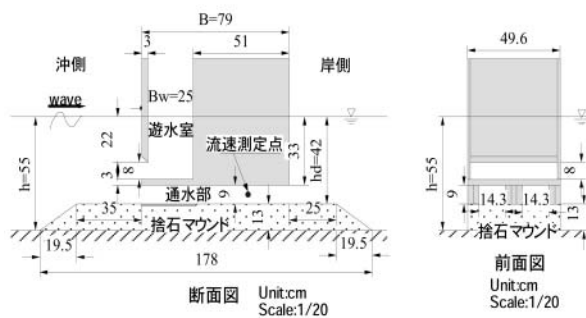


Fig. 13 通水部開口率の検討に用いた模型
(通水部開口率: 57%, マウンド高さ: 13cm)

化する, 設置水深を固定したケース, d_1 と hm が変化しないように, 通水部高さに連動させて設置水深を変化させたケースの2種類を実施した。これら各ケースの堤体条件をTable 3, 4に示す。このような2種類のケースを用いた理由は, 前面垂下版の吃水深が遊水室内のピストンモード波浪共振の生起に強く関係することによる(中村ら, 2002)。なお, 入射波は, 波高 $H = 5, 10, 15\text{cm}$, 周期 $T = 1.0 \sim 2.4\text{s}$ の範囲の規則波である。

3) 通水部の前面開口率の検討に用いた堤体条件等

現地の防波堤では, 通水部の構造形式として, パイプ構造やボックスカルバート構造などが利用されると想定される。ここでは, このように通水部を部分的に閉塞するときの通水部開口率が, 反射率, 透過率, 平均輸送流量などに及ぼす影響を実験的に検討した。模型堤体の代表例はFig. 13に示すもので, 通水部の構造を角型パイプとし, その左右開口寸法を変化させることで開口率を46~82%の範囲内で3種類に変化させた。このとき, 通水部高さは, 上記2)の検討結果を考慮して $td = 9\text{cm}$ と固定した。

この実験では, 一部の開口率において堤体の下部に捨石マウンドがない場合についても検討しており, 付随的に捨石マウンドの有無の影響などについても明ら

Table 5 通水部前面開口率の検討に用いた諸元

通水部前面開口率 (%)	水深 h (cm)	マウンド上水深 hd (cm)	垂下版吃水深 d1 (cm)	マウンド
96	42.0	—	22.0	無
57	42.0	—	22.0	無
82	44.0	31.0	11.0	有
82	55.0	42.0	22.0	有
57	44.0	31.0	11.0	有
57	55.0	42.0	22.0	有
46	44.0	31.0	11.0	有
46	55.0	42.0	22.0	有

かにした。検討に用いた堤体諸元などをTable 5に一括して示す。なお, 入射波の諸元および計測装置の配置は, 上記2)の検討のときとほぼ同様である。

結果および考察

1) 通水部高さの影響

a) 垂下版吃水深の影響

Fig. 14~16は, 水深 h を固定して通水部高さ td を変化させたときの反射率 Cr , 透過率 Ct および無次元輸送流量 Q^* の結果を示す。図中では, 周期を表すパラメータとして波長・遊水室幅比 L/Bw による変化で示し, 反射・透過率については, 減衰波理論に基づく算定結果についても併せ示す。理論算定では, 従来の成果および実験結果との整合性等を考慮して, 等価線形抵抗係数 $f_c = 0.2$ を用いた。ここで, 無次元輸送流量は, 1波・単位長さ当たり通過する輸送流量を20波程度の時間平均から算定し, これを波の質量輸送量である峰の水塊量(= $HL/2$)で除したものとした。

反射率 Cr の結果を示すFig. 14に着目すると, 通水部が狭くなることで, Cr が低減する有効周期帯は L/Bw の大きな長周期側に移行することが認められる。これは, 通水部高さの減少に伴い, 前面垂下版の吃水深が深くなるためである。一方, Fig. 15に示す透過率 Ct は, 通水部高さが狭くなると, 実験結果, 算定結果ともに低下する傾向が見られる。これは, 通水部が狭くなることで透過する波のエネルギーが減少するためと考えられる。

無次元輸送流量 Q^* は, いずれの通水部高さにおいても沖向きに生じることや, Cr が低下し始める周期条件より長周期側で有意な大きさとなり, 増加する傾向が認められる。これは, 遊水室内のピストンモード波浪共振の生起により, 前面垂下版の下端より強い渦流れが沖向きに発生し, その影響により沖側への平均流が引き起こされることによる。

そして, Q^* は通水部高さが低くなると流水面積が狭くなるため減少する傾向にあるが, 通水部高さ $td = 9\text{cm}$ では, $td = 13.5\text{cm}$ のときとほぼ同程度の量であ

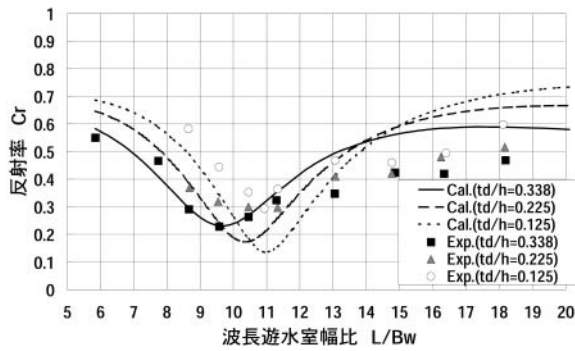


Fig. 14 各通水部高さ(垂下版吃水深)における反射率 C_r
($h=40\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$, $f_c=0.20$)

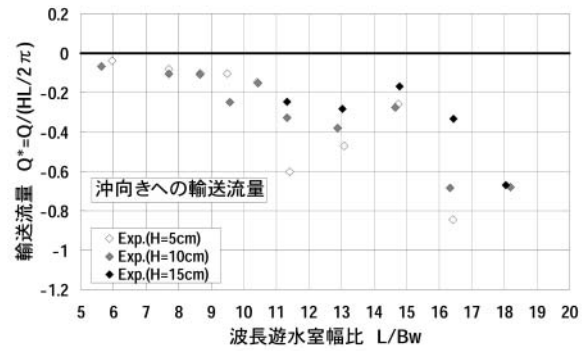


Fig. 17 波高別輸送流量 Q^*
($td=13.5\text{cm}$, $d_1/h_m=0.67$, $h=40\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$)

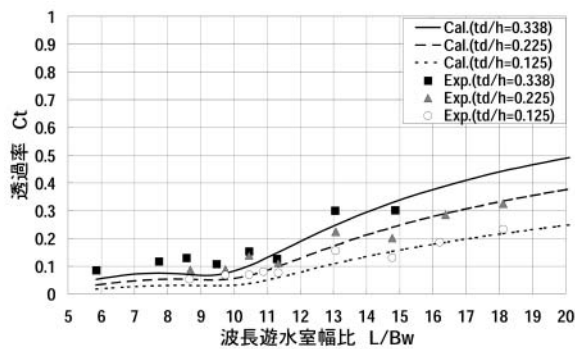


Fig. 15 各通水部高さ(垂下版吃水深)における透過率 C_t
($h=40\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$, $f_c=0.20$)

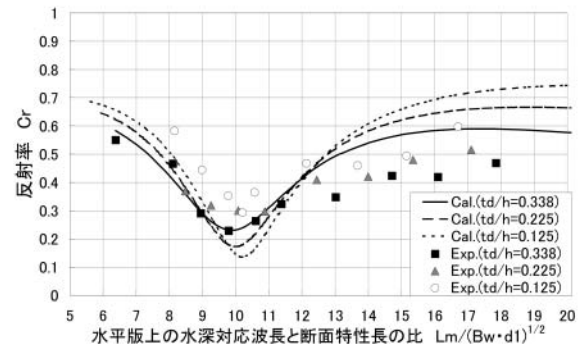


Fig. 18 各通水部高さ(垂下版吃水深)における反射率 C_r
($h=40\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$, $f_c=0.20$)

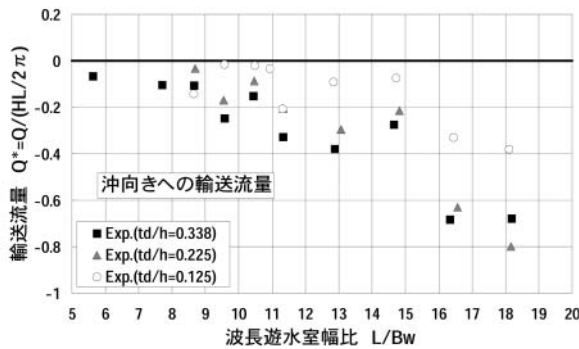


Fig. 16 各通水部高さ(垂下版吃水深)における輸送流量 Q^*
($h=40\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$)

り、透過波の低減効果を考え合わせると最適な通水部高さと言える。

Fig. 17は、 Q^* に及ぼす波高の影響を検討した結果を示す。この図より、多少のばらつきは見られるものの、作用波高が小さいほど Q^* は増加する傾向が見られる。無次元化の定義を考慮すると、輸送量は作用波高の1/2乗程度に比例するものと推測され、前面垂下版を潜堰とみなすような流量になるものと推定され

る。

Fig. 18は、波長と断面特性長との比を用いて、Fig. 15の C_r の結果を再整理したものである。ここで、断面特性長は、前面垂下版の吃水深 d_1 と遊水室幅 B_w の積の平方根で定義される。図中では、波長として、遊水室の特性に直接的に関係する没水平版上の水深に対応する波長 L_m が用いてある。この図より、通水部高さ(垂下版吃水深)に関係なく、 C_r が極小となる条件は、ピストンモード波共振の生起に対応する、 L_m と断面特性長の比がほぼ10程度であることや周期条件による変化特性が類似して、ほぼ一律に表せるようになることなどがわかる。なお、長周期側での実験値と算定値の差が大きくなるのは、実流体場で渦形成による逸散がより強く現れるためと推定される。

b) 水深の影響

Fig. 19, 20は、通水部高さを変化しても前面垂下版の吃水深が一定となるように、水深を通水部高さに連動して変化させた場合の C_r および Q^* の結果を示す。図中では、周期を表すパラメータとして没水平版上の水深に対応する波長 L_m と遊水室幅 B_w の比 L_m/B_w (遊水室波長・遊水室幅比)による変化および L_m と断面

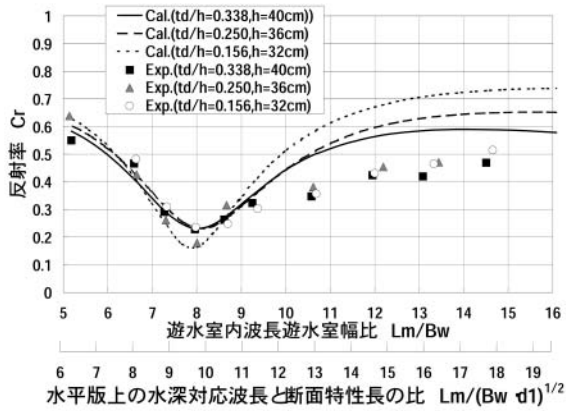


Fig. 19 通水部高さの違いによる反射率Cr：
設置水深hを通水部高さに伴い変化させた場合
($d_1/hm=0.67$, $H=10\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $fc=0.20$)

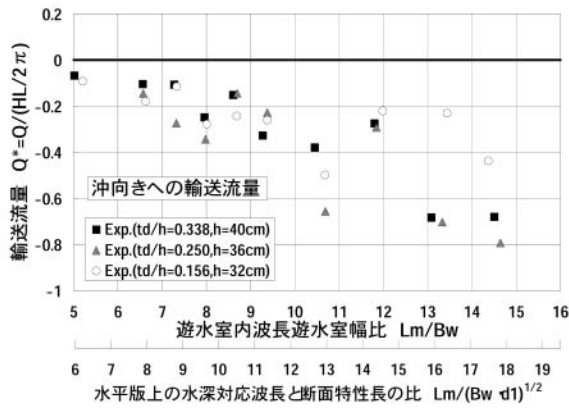


Fig. 20 通水部高さの違いによる輸送流量 Q^* ：
設置水深hを通水部高さに伴い変化させた場合
($d_1/hm=0.67$, $H=10\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$)

特性長 $(Bw \cdot d_1)^{1/2}$ の比の両者により示す。これらの図より、反射率Crは、通水部が狭くなっても、それほど変化はみられない。これは、やはり反射波の低減には、遊水室幅が同じときには前面垂下版の吃水深と水平版上の波長が最も強く影響することによるものと考えられる。一方、無次元輸送流量 Q^* は、やはり最も狭い通水部高さの条件のとき、極小になるものの、中間的な通水部高さのときには、有意な海水交換量が期待できることがわかる。

2) 通水部開口率の影響

a) 捨石マウンド無しの条件

このときの堤体は、Fig. 13に示すもので、捨石マウンドを取り除いたものに相当する。Fig. 21~23は、この条件下で通水部前面の開口率を変化させた場合の反射率Cr、透過率Ctおよび堤体単位幅当たりの断面平均輸送流量 Qa^* の結果をそれぞれ示す。図中では、周期を表すパラメーターである L/Bw による変化で表す。断面平均輸送流量 Qa^* は、通水部の前面開口率の影響を採

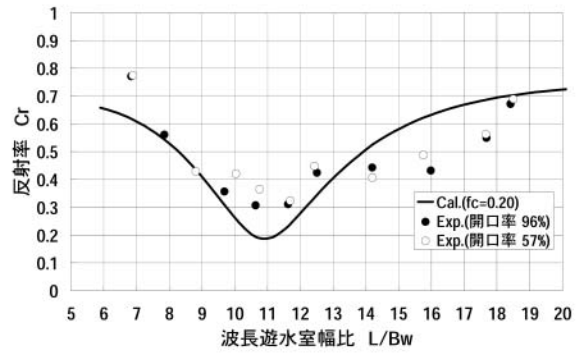


Fig. 21 通水部開口率の変化による反射率Cr
($H=10\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, マウンド無し)

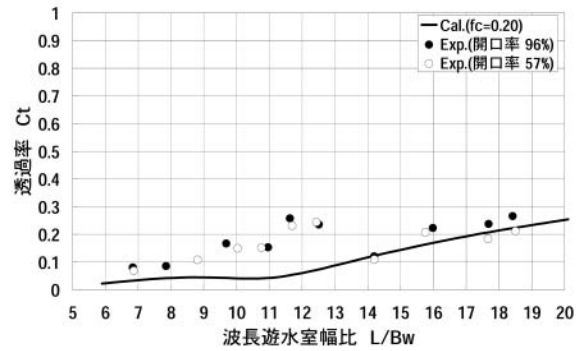


Fig. 22 通水部開口率の変化による透過率Ct
($H=10\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, マウンド無し)

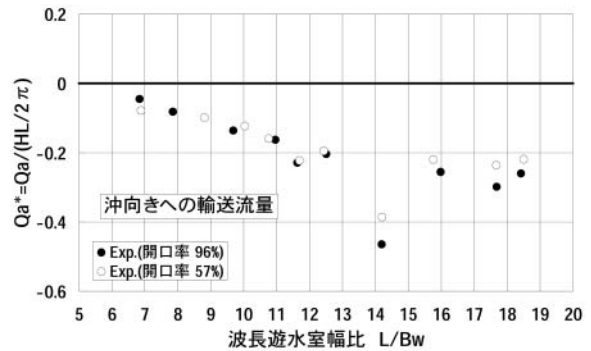


Fig. 23 通水部開口率の変化による単位幅当たりの断面平均輸送流量 Qa^*
($H=10\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, マウンド無し)

り入れるため新規に定義したもので、無次元輸送流量 Q^* に開口率を乗じて求められ、無次元の断面平均流量に相当する。

反射率Crの結果を示すFig. 21より、通水部開口率が57%と閉塞率が高い場合でも算定結果は実験結果とほぼ一致しており、Crは通水部の構造にほとんど影響されないことがわかる。透過率CtもCrと同様に開口率の影響はそれほど大きく受けないが、やはり開口率が小

さくなると若干ながら低下する傾向にある。なお、 C_t の実験結果は、開口率を100%とする算定結果よりも大きくなる場合も見られるが、これは用いた分断2水路の回流水槽の消波工側において、入射波測定用水路からの回り波と消波工よりの反射波の影響による誤差と考えられる。

平均輸送流量の結果を示すFig. 23より、 Qa^* は開口率が小さくなると多少ながら減少する傾向が見られる。しかし、 Qa^* の減少度合いは、開口率の割合に比較すると顕著でなく、通水部開口断面積の縮小の影響はあまり有意でないと判断される。そして、このような結果から、通水部での実質平均流速は、通水部開口率が小さくなると増大することが示唆される。

b) マウンド有りの条件

i) マウンド上の水深が深い場合 ($h=55\text{cm}$, $hd=42\text{cm}$)

Fig. 24～26は、この条件のときの反射率 C_r 、透過率 C_t および断面平均輸送流量 Qa^* の結果を示すもので、図中では通水部開口率が3種類に変化させてある。この図より、反射率は、やはり通水部開口率に依存することなく、ほぼ同じ周期特性および絶対値を示す。透過率についても、開口率が小さくなるとその絶対値は多少ながら低下する傾向が認められる。また、 Qa^* に着目すると、やはり開口率が小さくなると、流水断面積の低下により、その絶対値は減少する傾向が見られ、この傾向は長周期側で顕著である。ただし、短周期から中周期の条件下では、開口率による差異はそれほど大きくない。

一方、前出のマウンドなしのときの結果と比較すると、この場合にはマウンド下の水深が深いため同一周期条件でも波長が長くなり、 L/Bw による各水理量の変化を見ると、長周期側にシフトしたような結果となる。ただし、各水理量の絶対値については、マウンドの有無の相違はほとんど見られない。

ii) マウンド上の水深が浅い場合 ($h=44\text{cm}$, $hd=31\text{cm}$)

Fig. 27, 28は、この条件のときの反射率 C_r および断面平均輸送流量 Qa^* の結果を示す。この場合においても反射率は、やはり通水部開口率に依存しない結果となっている。ただし、理論算定では、減衰波理論で用いる線形抵抗係数 $f_c=0.4$ と大きくした結果が実験結果との一致度が良く、絶対値も低下する傾向にある。これは、遊水室内の水深が浅くなることおよび捨石マウンドによる波エネルギーの逸散効果によるものと推定される。断面平均輸送流量に着目すると、上述した水深が深い場合に比較して、各開口率での差異が縮小し、短・中周期帯において絶対値が増大する傾向が認めら

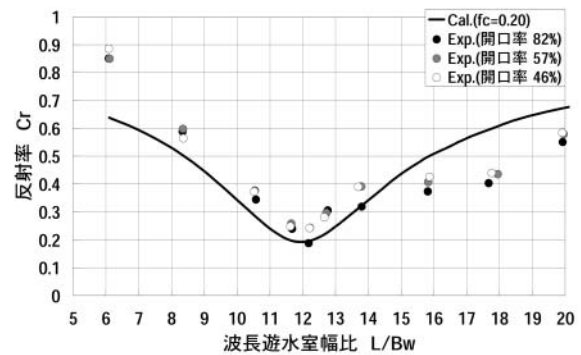


Fig. 24 通水部開口率の変化による反射率 C_r
($H=10\text{cm}$, $h=55\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $hd=42\text{cm}$, マウンド高さ 13cm)

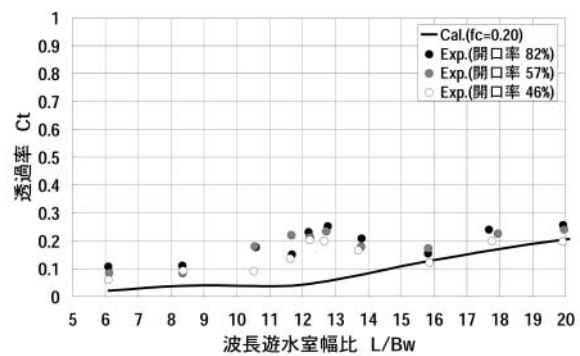


Fig. 25 通水部開口率の変化による透過率 C_t
($H=10\text{cm}$, $h=55\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $hd=42\text{cm}$, マウンド高さ 13cm)

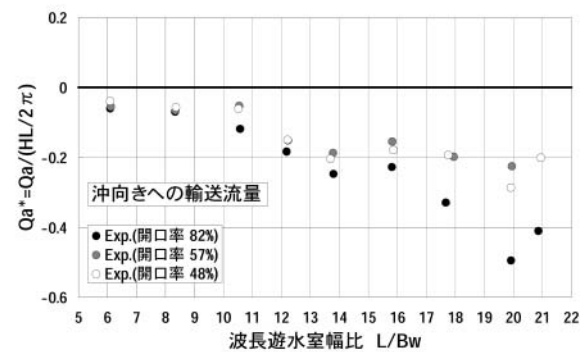


Fig. 26 通水部開口率の変化による単位幅当たりの断面平均輸送流量 Qa^*
($H=10\text{cm}$, $h=55\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $hd=42\text{cm}$, マウンド高さ 13cm)

れる。これは、遊水室内の水深が浅くなることで、垂下版下端よりの渦流れの強度が増すことによるものと考えられる。

結語

遊水室型海水交換防波堤の最適構造諸元について、主要な結果を以下に記す。

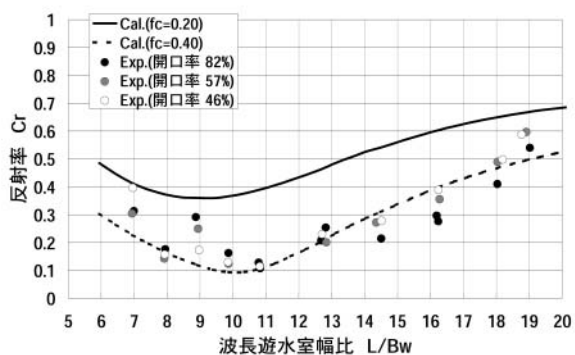


Fig. 27 通水部開口率の変化による反射率Cr
($H=10\text{cm}$, $h=44\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $hd=31\text{cm}$, マウンド高さ13cm)

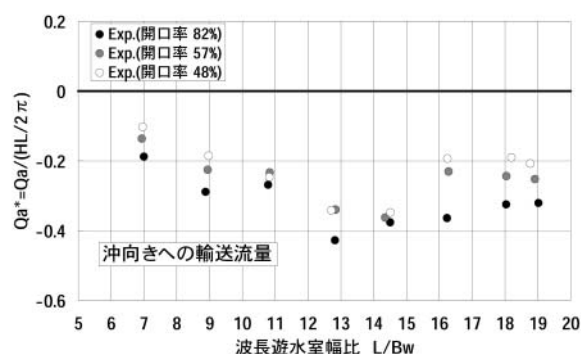


Fig. 28 通水部開口率の変化による単位幅当たりの断面平均輸送流量 Qa^*
($H=10\text{cm}$, $h=44\text{cm}$, $Bw=25\text{cm}$, $hd=31\text{cm}$, マウンド高さ13cm)

遊水室型海水交換防波堤の下部に設ける通水部高さを高くすると、透過率は多少ながら上昇する傾向にある。一方、反射率はそれほど変化せず、むしろ前面垂下版の吃水深に強く影響される。そして、反射率の周期による変動特性は、没水平板上の水深に対応する波長と垂下版背後の遊水室遮蔽断面積を用いて定義される断面特性長の比を用いると一律に表せる。

通水部高さや通水部前面開口率を狭めると、通水部平均流速は増大する傾向にあるが、開口面積が減少する影響の方がより強く表れ、結果的に平均輸送流量は減少する。ただし、通水部高さを水深の2割程度に設定すると、その低下度合いは小さく、しかも透過波の遮断効果に優れることから、望ましい通水部高さと言える。

マウンド上の堤体断面諸元をマウンドのない場合と同一にすると、マウンドの有無による反射・透過波の低減特性および海水交換量への影響はほとんど見られない。

模擬港湾での遊水室型海水交換防波堤の効果

検討方法

ここでは、模擬港湾を想定して、その港奥の一部に遊水室型海水交換防波堤（以下、遊水室型防波堤と称す）や従来形式の下部通水型矩形堤（以下、通水型矩形堤と称す）などを設置するときの海水交換特性や港内静穏度について、主に実験的に明らかにする。この際、上記した断面2次元の結果との比較も行う。また、より効果的な港内における海水交換を可能にするため、波除堤を兼ねた導流堤による平均流の流向制御の効果についても検討する。

1) 実験装置および実験方法

a) 模型堤体

模型堤体は、Fig. 29に示す堤体幅 $B=50\text{cm}$ 、遊水室幅 $Bw=25\text{cm}$ の遊水室型防波堤を基本型堤体として用いた。一方、比較実験として、従来において海水交換防波堤として用いられている通水型矩形堤を再現するため、遊水室前面の垂下版下部の開口部を図中の点線で示すように鉛直板で閉じた模型も用いた。

b) 実験水槽と模型港湾

この実験では、Fig. 30に示す水産工学研究所波浪平面水槽実験棟の平面水槽を用いた。水槽内には、漁港を模擬した港湾模型を設け、その外郭防波堤の一部にFig. 29の基本型の遊水室型防波堤5基(2.5m分に相当)を設置した。このとき、港内の平均流の流向制御を目的として、図中に示すように遊水室型防波堤と港口部の間に波除堤を模擬した不透過壁を設けた場合についても検討した。また、比較実験のため、遊水室型防波堤を通水型矩形堤および不透過堤に変更した場合も同様に検討した。この実験で用いた堤体の幅 B は、周辺防波堤との連続性を考慮して、全て $B=50\text{cm}$ とした。想定した模型の縮尺は1/20程度である。なお、この平

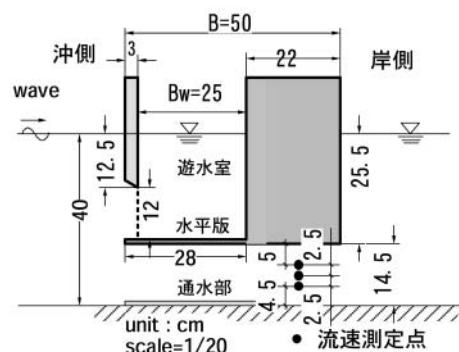


Fig. 29 実験に用いた遊水室型防波堤の構造諸元と流速の計測点

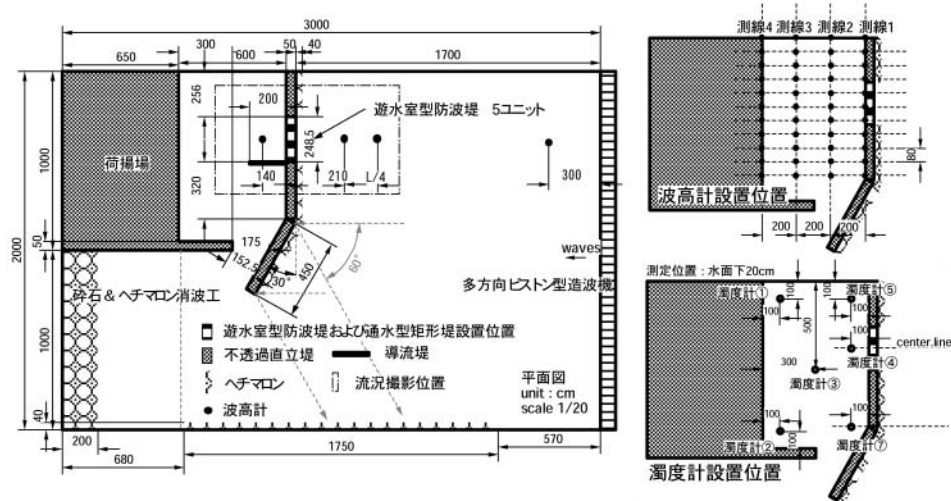


Fig. 30 模擬港湾模型の構造諸元および濁度計、波高計の設置位置

面水槽の終端側には、反復反射の影響を少なくするため、砕石とヘチマロンで構成される消波工を設けた。

c) 測定装置

港内静穏化効果は、Fig. 30に示すように、港内泊地の計44測点において波高測定を実施した。また、港湾域の平均流は、球形トレーサによる流況観測ならびにカオリン粘土を濁度に用いた希釈実験の両者により把握した。この際、濁度の希釈実験には濁度計6台を、流況観測には水槽上部からのビデオカメラ撮影およびその解析用にデジモ社の画像解析ソフトPTVを用いた。

海水交換防波堤下部の通水部および港湾港口部では、平均通水量などが検討できるように、計10台の電磁流速計を設置して水平流速を測定した。ただし、海水交換防波堤は、5基中の中央堤体のみを測定対象にした。

d) 実験条件および実験方法

実験に用いた作用波の条件は、上記した断面2次元の実験結果との比較が可能となるように、断面2次元実験で用いた波条件の中から代表的なものを選定した。この平面実験では、規則波のみならず実際場を想定して一方向不規則波も用いた。不規則波は、有義波での波高 $H_{1/3} = 5, 7 \text{ cm}$ 、周期 $T_{1/3} = 1.3, 1.4, 1.8 \text{ s}$ の計6種類の組み合わせとした。このとき、水深 h は、断面2次元実験と同様に40cmに固定した。

実験は、港内静穏度の検討実験、流況の観測実験および港内濁度の希釈実験の三者で独立に実施した。港内濁度の希釈実験では、最初に港口部を含む港湾開口部を閉じた状態下で、カオリン粘土による濁度が港内で均一濃度となるようによく攪拌しておき、波の作用開始と同時に開口部を開放した。そして、総時間で90

分にわたり継続して波を作用させ、濁度の希釈度合を連続的に測定した。

結果および考察

1) 波浪制御効果について

a) 反射波・透過波の低減効果について

Fig. 31, 32は、遊水室型防波堤および通水型矩形堤の反射率 Cr および透過率 Ct の波周期による変化を示す。周期に関する無次元量は、波長・堤体幅比 L/B を用いた。図中には、平面実験結果で近似的に測定した反射・透過率に加え、比較のため断面2次元実験による結果および減衰波理論に基づく算定結果も併せ示す。

これらの図から、遊水室型防波堤は通水型矩形堤に比較して、ほぼ全ての周期帯において反射率 Cr と透過率 Ct の両者が低くなるのがわかる。このような傾向は、算定結果においても認められる。特に遊水室型防波堤の反射率は、特定の L/B の条件下で極小となるなど、その低減効果が著しい。このような極小反射率の出現は、既に明らかにされているように、遊水室内のピストンモードの波浪共振による垂下版下部よりの強い渦流の発生による。また、断面2次元の実験結果と平面実験のそれとを比較すると、両者はほぼ一致しており、平面波浪場でも遊水室型防波堤の効果が同様に発揮できていることが確認できる。

b) 港内の静穏化効果について

Fig. 33は模擬港湾に遊水室型防波堤および通水型矩形堤を設置した場合、並びに堤体構造を全て不透過堤とした場合の港内平均波高比を示す。港内平均波高比は港内側の各測点（港口部を除く）における波高 H_x と入射波高の H の比の空間平均値とした。図中には、

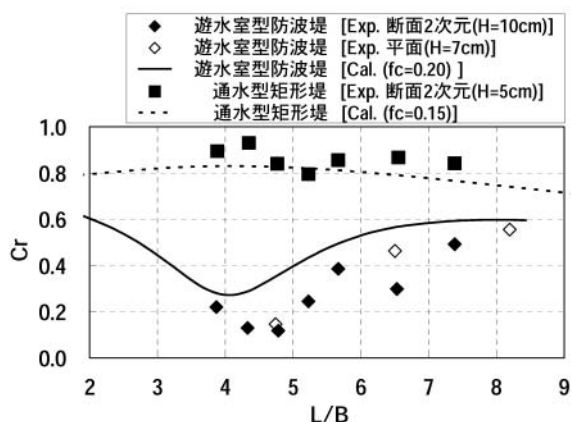


Fig. 31 反射率Crの特性 (Bw=25cm, B=50cm)

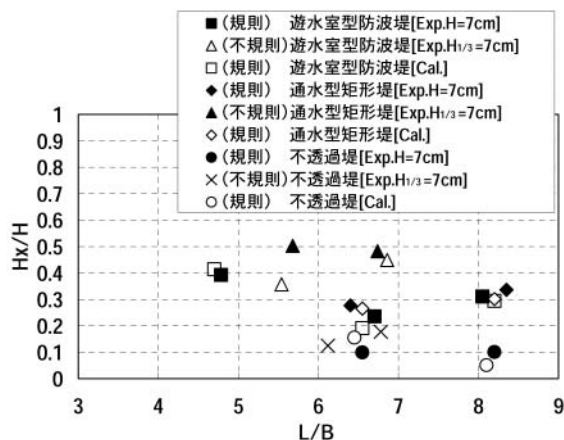


Fig. 33 港内平均波高比

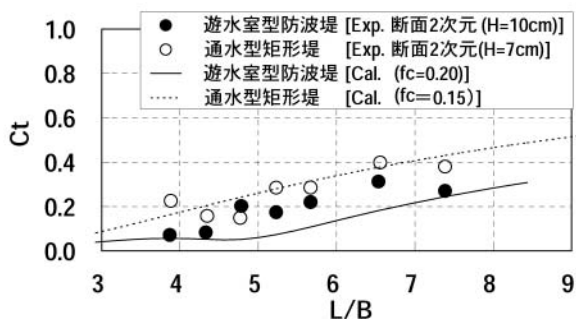


Fig. 32 透過率Ctの特性 (Bw=25cm, B=50cm)

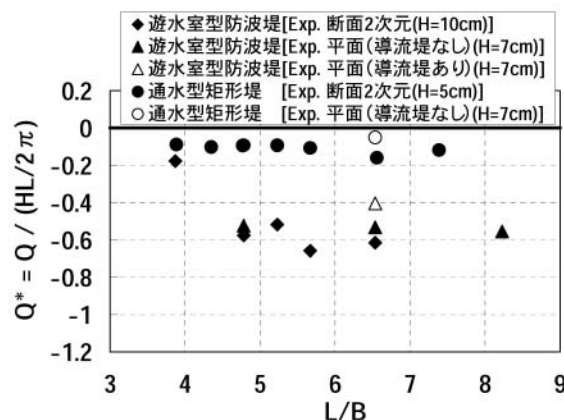


Fig. 34 規則波に対する輸送流量Q*

規則波と不規則波を用いた実験結果および算定結果を併せて示す。

この図の規則波の結果に着目すると、 L/B の小さな短周期側で港内波高は比較的大きく現れているが、これは港内水域の平面寸法と波長に関する湾水振動によるものと考えられる。特にここでは、港内側の周辺境界の反射率が高反射条件になっているため、このような傾向が比較強く現れたものと推定される。

このときの堤体構造による比較を行うと、 L/B が6.5程度の条件下では構造体による差異はほとんど見られないが、さらに長周期の条件になるとやはり不透過堤の場合が静穏化効果は最も高い。これは透過構造のとき、Fig. 32に示すように長周期側になると透過率が上昇するためと考えられる。そして、遊水室型防波堤と通水型矩形堤の結果を比較すると、両者には有意な差が認められない。

一方、不規則波の作用下では、透過構造のとき、静穏化効果は低下する傾向にある。これは、不規則波では各種の周期成分波を含むことから、上記した湾水振動の影響を受けやすく、港内波高が増加するものと推定される。

このように外郭防波堤の一部に透過構造の防波堤を

用いるときには、ある程度の透過波の影響は避けられず、港内の低反射構造化あるいは計画段階での湾水振動の特性の把握などが必要と考えられる。

2) 海水交換機能について

a) 通水機能の定量的な検討

Fig. 34は、遊水室型防波堤および通水型矩形堤の通水部において計測した水平流速から求めた無次元輸送流量 Q^* を示す。図中には、断面2次元実験結果に加え、平面実験結果も併せて示し、それらの L/B による変化で示す。 Q^* は単位幅輸送流量 Q を進行波による半周期間の移動水塊量 $HL/2$ で除したものである。ここでは沖向きへの流れを負と定義している。

この図より、遊水室型防波堤は、1波あたりの無次元平均流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れることがわかる。この海水交換機能は、通水型矩形堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。そして、遊水室型防波堤の輸送流量は、長周期側になると増大する傾向にあることなども認められる。

一方、断面2次元実験と平面実験の輸送流量の結果

を比較すると、防波堤形式に関係なく両結果はほぼ等しく、平面波浪場の港湾域でもほぼ同等の効果が得られることがわかる。ただし、模擬港湾に導流堤を設置した場合、1割程度の輸送流量の減少が見られる。これは、導流堤を設置することで、港内の平均流に対する負荷が大きくなり、結果として輸送流量が減少したものと考えられる。

Fig. 35は模擬港湾における不規則波実験に対する平均輸送流量の結果を示す。無次元輸送流量 Q^* の算出には、平均波および有義波の諸元の両者を用いて求めた。この図より、遊水室型防波堤と通水型矩形堤の輸送流量の実験結果を比較すると、規則波の場合と同様に、遊水室型は有意な海水交換機能を持つことが確認できる。また、Fig. 34の規則波に対する平面実験結果と比較すると、不規則波に対する輸送流量は、遊水室型防波堤、通水型矩形堤ともに、不規則波の代表波として有義波を用いる方が両結果の対応のよいことが認められる。

b) 港湾域の流れについて

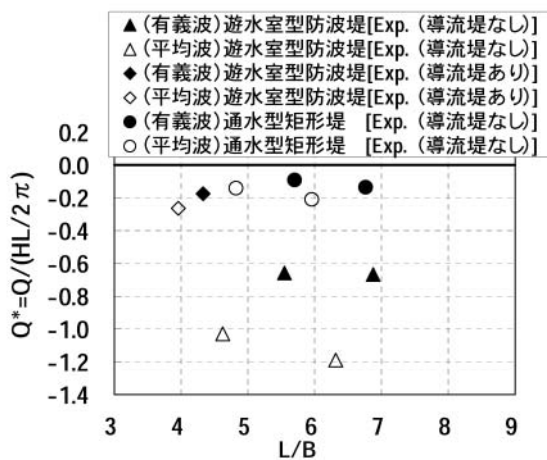


Fig. 35 不規則波に対する輸送流量 Q^*
(平面実験, $H_{1/3}=7\text{cm}$)

Photo 2 は、模擬港湾において観測した港湾域のフロートの移動軌跡を示す。図中の軌跡は2s毎にプロットしており、300s間の流跡線を描いた。また、図中には代表的な地点における、フロートの移動距離と時間から求めた無次元の平均表面流速 U^* を示す。 U^* は、進行波の静水面位置での水平流速振幅(= $H/T \cdot \text{coth}(kh)$)で無次元化した量に相当する。

これらの図より、遊水室型防波堤を設置した場合、港口部(図中の中央下方)より港内に向かって水が流入し、防波堤より港外側に流出する様子が確認できる。また、港口部よりの流入水の一部は、港内で循環流を形成することも認められる。陸域側港奥への港外水の導入を目的として波除堤を兼ねた導流堤を設置すると、導流堤に沿って湾奥に向かう流れが形成され、設置しない場合と比較して循環流の回転方向が反対になるなど、港内の流況は大きく異なることがわかる。このような検討から、港内の海水交換を効果的に進めるには、断面2次元の海水交換機能のみならず港内での平均流の平面的な流況を考慮した港内施設の配置等の検討が重要になると言える。

Fig. 36は、模擬港湾における複数測定点の濃度変化の平均値を各波条件について示す。図中では、濃度を

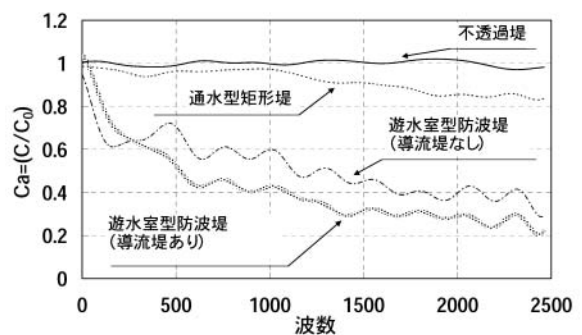
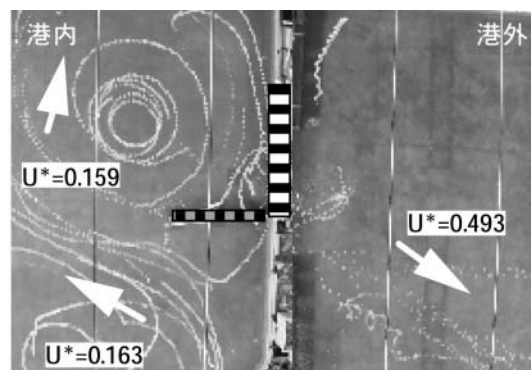


Fig. 36 港内の濃度変化
($H=5\text{cm}$, $T=1.3\text{s}$, 規則波)



(a) 導流堤なし



(b) 導流堤あり

Photo 2 遊水室型防波堤付近の流況 ($H=7\text{cm}$, $T=1.8\text{s}$, 露出間隔: 2s毎に300s間)

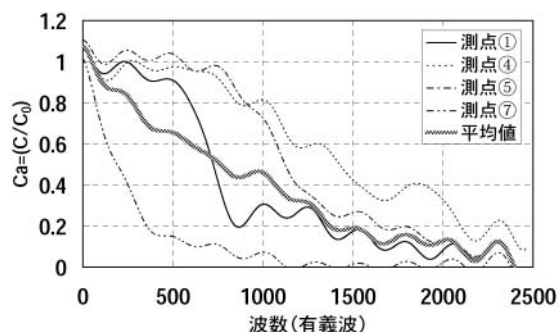


Fig. 37 港内の濃度変化 ($H_{1/3}=5\text{cm}$, $T_{1/3}=1.3\text{s}$, 不規則波)

造波開始時の初期濃度で除した無次元濃度 Ca の作用波数による経時変化を示す。この図より、通水型矩形堤と不透過堤の場合には明らかに濃度の低下が遅く、遊水室型防波堤を設置した場合には、順次濃度が低減されていることがわかる。

また、港湾に導流堤を設置した場合、上記の表層流況の検討により、導流堤を設置しない場合と比較して、港内の循環流の流向変化の影響が明確に現れることから、港奥における濃度低下も早くなる傾向が確認されている。しかし、導流堤の設置の有無にかかわらず、遊水室型防波堤を設置した場合には、ほぼ全ての測点において濃度の低減が確認され、効果的な海水交換が可能であると考えられる。

Fig. 37は遊水室型防波堤で導流堤を設置した場合の不規則波における濁度変化の実験結果を示す。図中には、代表的な測点の濃度変化とそれらの平均値を併せ示しており、経過時間を有義波周期で除した有義波の波数による変化で示す。この図から、不規則波に対しても規則波と同様に順次濃度が低減されており、効果的な海水交換が可能であると考えられる。

結語

模擬港湾を想定し、その港奥の一部に遊水室型海水交換防波堤を設置するときの海水交換特性や港内静穏度について、実験的に検討を行った。主要な結果を以下に記す。

波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤は、規則波および不規則波に関係なく、1波あたりの無次元平均流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れる。この海水交換機能は、従来のケーソン堤下部を通水式とする海水交換防波堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。なお、不規則波の代表波としては、有義波を用いると規則波の結果との対応が良い。

外郭施設である防波堤の一部を遊水室型海水交換防波堤とすることで、港内に有意な平均流が発

生し、港内水の海水交換に対して有効である。このとき、港内の海水交換を効果的に進めるには、断面2次元的な海水交換機能のみならず、港内での平均流の平面的な流況を考慮した、波除堤や導流堤など港内施設の平面配置も重要になる。

防波堤の一部を遊水室型海水交換防波堤としても、港内の静穏化効果はある程度は維持できる。しかし、低波高といえども透過波の影響は無視できず、港内側境界の低反射構造化などが望ましい。

おわりに

新たな機構を活用した波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤を開発し、本防波堤の構造諸元が波浪制御効果および海水交換促進効果に与える影響を検討してその有効性を検証した。本防波堤は、従来の海水交換防波堤と異なり、港内水を港外へ排水して海水交換を図る方式であること、曝気、鉛直混合を促進し、貧酸素問題の解決への寄与が期待される点に特長がある。一方、防波機能については、幅広い周期帯で高い消波効率を示すとともに、波長・遊水室幅比が相当程度大きい波浪条件に対しても、有効に機能することが明らかになった。このため、現地条件に拠っては、コスト縮減に資する波浪制御構造体と成り得ることが期待される。

なお、本研究は、独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所と財団法人災害科学研究所沿岸新技術研究会（オリエンタル建設株式会社、極東工業株式会社、五洋建設株式会社、株式会社三柱、JFEエンジニアリング株式会社、積水化成工業株式会社、日立造船鉄構株式会社、復建調査設計株式会社、みらい建設工業株式会社で構成）の共同研究（「沿岸防災と海域環境の保全・再生を目的とする漁港・漁場施設の開発」（平成15～17年度）および「波浪エネルギーを利用する多機能型の漁港・漁場施設の開発」（平成18年度～））において実施した。既に、本防波堤の浅海域から大水深までの適応を想定したブロック積式、ケーソン式、杭式的设计・施工法の検討を終え、現在、実用化段階にあることを述べてむすびとする。

参考文献

- 土木学会編，2000：海岸施設設計便覧2000年版，582pp．
- 沿岸開発技術研究センター，2001：数値波動水路の研

- 究・開発 (CADMAS-SURF) - 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書 - , 沿岸開発技術ライブラリー, 12, 財団法人沿岸開発技術研究センター, 東京, 296pp .
- 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池 治, 1976: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法. 港湾技研資料, 248, 1-24 .
- 中村孝幸, 井手善彦, 1997: 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 13, 177-182 .
- 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝, 1999: 渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 46, 796-800 .
- 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲巖, 河野 徹, 2002: ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造の海水交換型防波堤の開発, 海岸工学論文集, 49, 661-665 .
- 大村智宏, 中山哲巖, 前川拓司, 1997: 潮位差が大きい漁港での波浪エネルギーによる海水交換の検討, 海岸工学論文集, 44, 986-990 .
- 大村智宏, 2002: 円孔式海水導入工の開発研究, 水産工学, 39(2), 131-138 .
- Ohmura Y., 2006: Wave set-up induced flow in seawater exchange structures with blockwork mounds. *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, San Diego.